

УДК 697.9:621;697:621

**ТЕРМОРЕНОВАЦІЯ СИСТЕМИ КОНДИЦІОНУВАННЯ ПОВІТРЯ
ВИРОБНИЧИХ ПРИМІЩЕНЬ**

Возняк О.Т., к.т.н., доцент,
Сухолова І.Є., к.т.н.,
Савченко О.О., к.т.н., доцент,
Довбуш О.М.

Національний університет «Львівська політехніка»
orest.voznyak@i.ua

Анотація. Важливим пріоритетним завданням економічної політики України є дбайливе використання енергоносіїв. В країні проводиться широкомасштабна політика в галузі енергоощадності, а задачі енергоощадності є комплексними та охоплюють як законодавчу базу, так і технічні інновації. Одним з ефективних способів зменшення енергозатрат на потреби холодопостачання є проведення термомодернізації системи кондиціонування повітря (СКП). В даній статті наведені економічні показники термомодернізаційних заходів при реконструкції СКП виробничого приміщення. При реконструкції СКП приймалися до порівняння такі термомодернізаційні заходи: заміна режиму роботи СКП із стаціонарного на змінний, встановлення двострумінних повітророзподільників, встановлення автоматики Velimo, застосування настільних струмін.

Ключові слова: енергоощадність, система кондиціонування повітря, термомодернізаційні заходи, енергоаудит.

**ТЕРМОРЕНОВАЦІЯ СИСТЕМИ КОНДИЦІОНУВАННЯ ВОЗДУХА
ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПОМЕЩЕНИЙ**

Возняк О.Т., к.т.н., доцент,
Сухолова І.Є., к.т.н.,
Савченко Е.А., к.т.н., доцент,
Довбуш А.М.

Національний університет «Львівська політехніка»
orest.voznyak@i.ua

Анотація. Важной пріоритетной задачей экономической политики Украины является бережное использование энергоносителей. В стране проводится широкомасштабная политика в области энергосбережения, а задачи энергосбережения являются комплексными и охватывают как законодательную базу, так и технические инновации. Одним из эффективных способов уменьшения энергозатрат на нужды холодноснабжения является проведение термомодернизации системы кондиционирования воздуха (СКВ). В данной статье приведены экономические показатели термомодернизационных мероприятий при реконструкции СКВ производственного помещения. При реконструкции систем СКВ принимались к сравнению такие термомодернизационные мероприятия: замена режима работы СКВ со стационарного на переменный, установка двухструйных воздухораспределителей, установки автоматики Velimo, применение настільных струй.

Ключевые слова: энергосбережение, система кондиционирования воздуха, термомодернизационные меры, энергоаудит.

RENEWAL OF AIR CONDITIONING SYSTEM OF MANUFACTURING PREMISES

Voznyak O.T., Ph.D., Associate Professor,
Sukholova I.Ye., Ph.D.,
Savchenko O.O., Ph.D., Associate Professor,
Dovbush O.M.
National University "Lviv Polytechnic"
orest.voznyak@i.ua

Abstract. An important priority of the economic policy of Ukraine is the careful use of energy. Therefore, a large-scale energy saving policy is being implemented in the country, and energy efficiency objectives are comprehensive and cover both the legislative framework and technical innovations. A large amount of energy is spent on creating an artificial microclimate in industrial premises. One of the effective ways to reduce energy consumption for cold water needs is to carry out the thermal modernization of the air conditioning system (ACS). The economic indicators of thermal renewal measures during the reconstruction of the ACS of the industrial premises are given in this article. During the reconstruction of ACS, the following thermal modernization measures were taken for comparison: replacement of the operation of the ACS from the stationary to the alternating, the installation of two-jets air distribution devices, the installation of Belimo automation, the use of spread jets.

Keywords: energy saving, air conditioning system, thermal renovation, energy audit.

Вступ. У наш час питання енергоощадності, обліку енергоресурсів і управління їх витратою є надзвичайно актуальними. В умовах гострої економічної кризи дбайливе використання енергоносіїв є важливим пріоритетним завданням економічної політики України. На сьогоднішній час, як першочергове завдання, в нашій країні проводиться широкомасштабна політика в галузі енергоощадності. Задачі енергоощадності в Україні є комплексними і охоплюють аспекти як зовнішнього теплопостачання, так і внутрішніх інженерних систем споруд (опалення, вентиляції та кондиціонування повітря), а також законодавчої бази і технічної інновації. Так, велика кількість енергії затрачається на створення штучного мікроклімату у виробничих приміщеннях. Одним з енергоощадних способів опалення високих приміщень є системи з інфрачервоними обігрівачами [1], які дозволяють цілеспрямовано частково обігрівати різні зони виробничого приміщення. Для зменшення тепловтрат у системах теплопостачання доцільним є утеплення фасонних елементів та запірної арматури [2].

Не викликає сумніву той факт, що енергозатрати на потреби холодопостачання системи кондиціонування повітря (СКП) необхідно також зменшувати в результаті проведення термомодернізації. Для досягнення максимального ефекту слід визначити економічно доцільний рівень теплозахисту систем забезпечення мікроклімату, який повинен бути оптимальним як в теплотехнічному, так і в економічному відношенні. Вибір енергоощадних умов експлуатації діючих холодильних машин часто проводять з використанням ексергетичного аналізу, який дозволяє встановити максимальні термодинамічні можливості системи, а відповідно енергоощадні умови їх експлуатації [3].

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Як показують дослідження, при реконструкції систем кондиціонування повітря заслуговують уваги такі термомодернізаційні (енергоощадні) заходи (ТРЗ): заміна режиму роботи СКП із стаціонарного на змінний, встановлення двострумінних повітророзподільників ДСПР, встановлення автоматики Belimo, застосування настільних струмін.

Зокрема, двострумінний повітророзподільник ДСПР дозволяє подавати припливне повітря у верхню зону приміщення різного призначення [4] з утворенням закрученої і плоскої настільної струмін. За рахунок наявності рухомих пластин, які прикріплені до дифузора повітророзподільника (рис. 1.), відбувається покращення аеродинамічних показників результуючого повітряного потоку за рахунок зменшення коефіцієнтів затухання швидкості і

температури припливної струмини. Це сприяє зменшенню продуктивності системи кондиціонування повітря. Рухомі пластини дозволяють збільшувати кут розширення струмини і утворювати закручену струмину з великою інтенсивністю перемішування припливного повітря з повітрям робочої зони. Гвинт регулювання щілини дає можливість змінювати кількість припливного повітря, що проходить через кільцеву щілину.

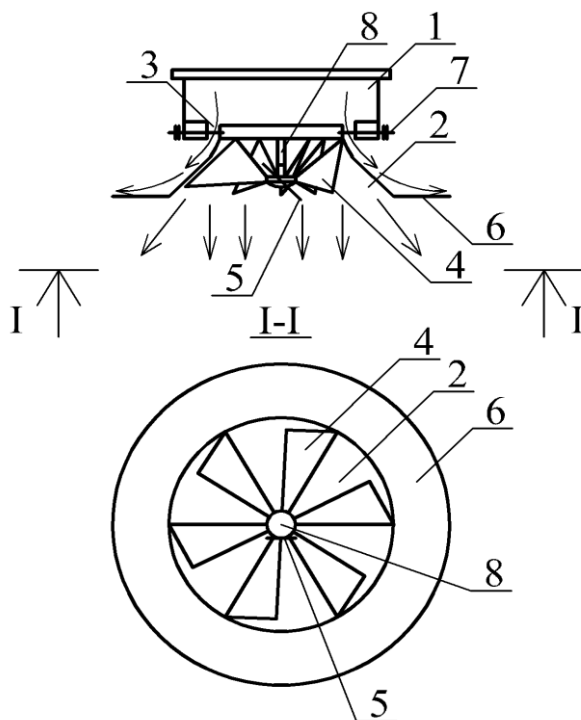


Рис. 1. Двоструминний повітророзподільник ДСПР із утворенням закрученої і плоскої настільної струмини:

1 – припливний патрубок; 2 – дифузор; 3 – кільцева регульована щілина; 4 – пластини; 5 – ручка керування; 6 – відбійний козирок; 7 – гвинт регулювання щілини; 8 – стержень

Саме економічна оцінка енергоощадних заходів передбачає використання сучасної методики оцінки економічної ефективності термомодернізації систем, яка враховує новітні концепції економічних розрахунків, зокрема рекомендації UNIDO (United Nations Industrial Development Organization). Згідно з концепцією UNIDO, ввівши деякі умовні позначення, для кожного “простого” ТРЗ_i, де $i = 1 \div n$, визначено такі основні економічні характеристики [5]:

- I_i – інвестиційні кошти на реалізацію ТРЗ_i, грн;
- K_i – річні кошти, зекономлені за рахунок зменшення енергозатрат системи при можливій реалізації термомодернізації згідно з ТРЗ_i, грн/рік;
- $SPBT_i$ (Simply Pay Back Time – S_i) – простий час повернення коштів (видатків), який не враховує фактор інфляції, роки;
- $NPVR_i$ (Net Present Value Ratio – Y_i) – показник змінної вартості нетто; прибуток від реалізації даного ТРЗ_i за час розгляду інвестиції, грн.;
- IRR_i (Internal Rate of Return) – внутрішній ступінь повернення видатків, %.

Очевидним є факт, що не уникнути ситуації, коли логічним є одночасне поєднання довільних двох і більше “простих” ТРЗ, які знаходяться у “списку”. Для подальшої зручності стосовно індексів, доцільно позначити їх таким чином: 1-ий термомодернізаційний захід – ТРЗ₁, 2-ий – ТРЗ₂, тощо. Отже, існує об’єктивна необхідність розглядати додаткові “сукупні” термомодернізаційні варіанти (ТРВ), які є продуктом поєднання двох і більше “простих” ТРЗ, вибраних із “списку”. Позначимо їх згідно з вибраними індексами, таким чином: ТРВ₁₂ (сумісна дія 1-го термомодернізаційного заходу ТРЗ₁ та 2-го – ТРЗ₂), ТРВ₁₃ (сукупність ТРЗ₁ та ТРЗ₃), ТРВ₂₃ (сумарний ефект ТРЗ₂ та ТРЗ₃), ТРВ₁₂₃ (сукупність трьох термомодернізаційних заходів: ТРЗ₁,

ТРЗ₂ та ТРЗ₃), тощо. Ці термореноваційні варіанти, названі “сукупними”, слід трактувати як самостійні ТРВ, що мають свої показники: *SPBT*, *NPVR*, *IRR*.

Якщо n – кількість ТРЗ, то сумарна кількість ТРВ становить 2^n . Постає запитання, який із всіх цих 2^n ТРВ є економічно найефективнішим? Для відповіді необхідно розглянути і проаналізувати методику проведення енергоаудиту системи, провівши певну її оптимізацію.

Кількість “сукупних” ТРВ визначається кількістю комбінацій C_n^m , де n – кількість можливих ТРЗ зі “списку”, а m змінюється від 0 до n . Отже, кількість “сукупних” ТРВ чисельно дорівнює сумі коефіцієнтів бінома Ньютона 2^n .

Для якомога кваліфікованішого проведення енергоаудиту доцільно розглянути максимально можливу кількість ТРЗ, якою може оперувати енергоаудитор, тобто так званий “список” повинен бути якнайповнішим. У зв’язку з цим, виникає необхідність створення такої методики проведення енергетичного аудиту, яка б дозволяла уникнути громіздкості при розгляді всіх можливих ТРВ, даючи можливість обгрунтовано зменшити їх кількість, і в той же час безпомилково визначити найоптимальніший кінцевий результат – рекомендацію енергоаудитора замовникові.

Отже, в кінцевому результаті, для проведення оптимізації необхідно скомпонувати квадратну матрицю з кількістю рядків n та стовпців n , що, власне, і дорівнює кількості всіх “простих” ТРЗ, а саме n . Кількість “сукупних” ТРВ _{j} , позначених знаками “+”, збільшуватиметься на 1 в кожному наступному стовпці, поки не досягне в останньому сумарної кількості “простих” ТРЗ (табл. 1). В ній арабськими цифрами пронумеровані “прості” ТРЗ, а римськими – “сукупні” ТРВ. У зв’язку з цим констатуємо, що рядки необхідно заповнювати відповідними термореноваційними заходами в міру зростання їхнього параметра S_i , тобто від $SPBT_{\min}$ до $SPBT_{\max}$.

Вихідні дані для проведенні енергоаудиту СКП: місце будівництва, будівельна частина (плани, розрізи, будівельні конструкції та ін.), річні енергозатрати на потреби холодопостачання системи кондиціонування повітря Q_x , МДж/рік, вартість енергозатрат P_x , грн/МДж, дані для підрахунку кошторисної вартості термомодернізаційних робіт I_i , грн, ступінь дисконту r (економічний аналіз проводиться при умові сталих в часі цін та часу розгляду інвестиції $t = 15$ років).

Мета. Встановити економічні показники термореноваційних заходів при реконструкції системи кондиціонування повітря виробничого приміщення.

Результати досліджень. Для реконструкції системи кондиціонування повітря вибрані такі термореноваційні заходи: заміна режиму роботи СКП із стаціонарного на змінний, встановлення двострумінних повітророзподільників ДСПР, встановлення автоматики Belimo, застосування настільних струмін. Визначення оптимального термореноваційного варіанта та його економічні параметри здійснюється за наступним алгоритмом:

1. Розрахунок річних енергозатрат на потреби холодопостачання СКП Q_x , МДж/рік і цей варіант вважається “базовим” (нульовим).

2. Вибір “списку” термореноваційних заходів для даної системи, зокрема:

2.1. Заміна режиму роботи СКП із стаціонарного на змінний.

2.2. Встановлення двострумінних повітророзподільників ДСПР.

2.3. Реконструкція системи повітророзподілення.

2.4. Встановлення автоматики.

2.5. Застосування настільних струмін.

Вартість електроенергії прийнято 194 коп. за 1 кВт·год (II клас напруги до 27,5 кВ для промислових та прирівняних до них споживачів з потужністю до 750 кВА). Коефіцієнт перетворення електричної енергії в енергію холоду становить $\varepsilon = 3 - 5$. Відтак величину P_x прийнято $P_x = 0,2$ грн / МДж.

3. Обчислення енергоощадності ΔQ_i кожного ТРЗ _{i} як $\Delta Q_i = Q_o - Q_i$, а відтак – річної економії K_i , грн/рік:

$$K_i = \Delta Q_i \cdot P_x \quad (1)$$

Результати розрахунків зведено в табл. 1.

Таблиця 1 – Характеристики енергоощадних заходів

№ з/п	Заходи	Енергозатрати за “базовим” варіантом Q_o , МДж/рік	Після зміни Q_i , МДж/рік	Енергоощадність ΔQ_i $\Delta Q_i = Q_o - Q_i$, МДж/рік	Ощадність коштів K_i $K_i = \Delta Q_i \cdot P_x$, грн/рік
1.	Заміна режиму роботи СКП	9233	6122	3111	622,2
2.	Встановлення ДСПР	9233	6487	2746	549,2
3.	Встановлення автоматики	9233	6122	3111	622,2
4.	Ефект настилання	9233	8771	462	92,4

4. Підрахунок інвестиційних затрат I_i на роботи по кожному ТРЗ_{*i*} (табл. 2).

5. Визначення показників кожного ТРЗ: $SPBT_i$, $NPVR_i$ та IRR_i (табл. 2).

5.1. Обчислення величини $SPBT_i$ (S_i):

$$S_i = \frac{I_i}{K_i} \quad (2)$$

5.2. Розрахунок показника $NPVR_i$ (Y_i).

Для обчислення величини $NPVR_i$ для i -го ТРВ попередньо визначено річні прибутки K'_i за формулою:

$$K'_i = K_i - T_i - \Delta T_i, \quad (3)$$

де K_i – річна економія коштів, грн/рік;

T_i – податки (taxes), грн/рік;

ΔT_i – інші витрати, грн/рік.

(Було прийнято $T_i = \text{ПДВ}$ в розмірі 20 %, а величиною ΔT_i знехтувано).

За час t років обігові кошти CF_i (cash flow):

$$CF_i = K'_i \cdot t. \quad (4)$$

Визначено показник інфляції A за час t років при відомому ступені дисконта r , який приймається за даними банківських установ:

$$A = \frac{1}{(1+r)^t}. \quad (5)$$

Сумарні надходження B за час t років:

$$B_i = CF_i \cdot A. \quad (6)$$

Показник змінної вартості нетто $NPVR_i$ (Y_i):

$$Y_i = B_i - I_i. \quad (7)$$

Таблиця 2 – Економічні показники термореноваційних заходів

Ч/ч	Заходи	I_i	K'_i	$SPBT_i$ (S_i)	$NPVR_i$ (Y_i)	IRR_i
		грн	грн/рік	рік	грн	%
1	Заміна режиму роботи СКП	2200	622,2	3,54	+7133	+10,2
2	Встановлення ДСПР	2943	549,2	5,36	+5295	+7,14
4	Встановлення автоматики	6000	622,2	9,64	+3333	+3,00
5	Ефект настилання струмин	600	92,4	6,49	+786	+5,77

5.3. IRR_i – чисельно дорівнює ступеню дисконта r_i при умові $NPVR_i = 0$ ($Y_i = 0$), тобто це є максимальна інфляція (r_i), при якій інвестовані кошти окупляться з урахуванням інфляції, але без одержання прибутку.

$$Y_i = \frac{K_i' \cdot t}{(1+r_i)^t} - I_i. \quad (8)$$

Оскільки за умовою $Y_i = 0$, то:

$$\frac{K_i' \cdot t}{(1+IRR_i)^t} = I_i. \quad (9)$$

Оскільки за означенням $t = 15$ років, то $15K_i' = I_i(1+IRR_i)^{15}$, звідки:

$$IRR_i = \left(\frac{15K_i'}{I_i} \right)^{\frac{1}{15}} - 1 \quad (10)$$

6. Проведення оптимізації термореноваційних варіантів (табл.3).

Оскільки розгляд ТРВ у кількості 2^n є надзвичайно громіздким процесом, то доцільно його спростити, використавши науково обґрунтовану методику, спрямовану на зменшення необхідної кількості ТРВ, тобто провести відповідну оптимізацію (табл. 3).

Таблиця 3 – Оптимізація варіантів згідно з п.6.

Ч/ч	Заходи	Варіанти			
		I	II	III	IV
1	Заміна режиму роботи СКП.	+	+	+	+
2	Встановлення ДСПР.		+	+	+
3	Ефект настилання струмин.			+	+
4	Встановлення автоматики.				+
	Показники				
1	Інвестиційні видатки I (грн.)	2200	5143	5743	11743
2	Річна економія K (грн.)	622,2	1171,4	1263,8	1886,0
3	Простий час повернення – $SPBT$ (рік)	3,54	4,39	4,54	6,23
4	Показник змінної вартості нетто – $NPVR$ (грн.)	+7133	+12428	+13214	+16547
5	Внутрішній процент повернення – IRR (%)	+10,2	+8,58	+8,33	+6,07

Для проведення такої оптимізації було скомпоновано квадратну матрицю (табл. 3) з кількістю рядків n та стовпців n , що, власне, і дорівнює кількості всіх “простих” ТРЗ, а саме n . Кількість “сукупних” ТРВ_{*j*}, відмічених знаками „+”, збільшуватиметься на 1 в кожному наступному стовпці, поки не досягне в останньому сумарної кількості “простих” ТРЗ (табл. 3). В ній арабськими цифрами пронумеровані “прості” ТРЗ, а римськими – “сукупні” ТРВ. Рядки в табл. 3 заповнено відповідними термореноваційними заходами в міру зростання їхнього параметра S_i , тобто від $SPBT_{\min}$ до $SPBT_{\max}$. Після визначення економічних показників всіх “сукупних” ТРВ із складеної матриці оптимальним вважається варіант із показником $NPVR_{\max}$ ($Y_j = \max$).

Таким чином, в загальному випадку ТРЗ_{*i*} розташовуються в табл. 3 в порядку зростання величини $SPBT_i$ та розглядаються необхідні ТРВ_{*j*} як сукупні ТРЗ, а оптимальним вважається той ТРВ_{*j*}, в якого показник $NPVR_j$ (Y_j) є найбільшим.

Слід зазначити, що прибутковим буде ТРЗ_{*i*} з показником $NPVR_i > 0$ та $IRR_i > r$, а збитковими, відповідно, $NPVR_j < 0$ та $IRR_j < r$. Разом з тим важливо зауважити, що збитковий ТРЗ в сукупності з прибутковими ТРЗ іноді утворює прибутковий ТРВ. Але такий ТРВ дещо погіршує ситуацію і не може мати показника $NPVR_{\max}$, тобто не буде оптимальним.

Проведемо оптимізацію ТРВ із врахуванням даних п.6 і скомпонуємо табл. 3 впорядковано від першого ТРЗ₁ “заміна режиму роботи системи із стаціонарного на змінний”, в якого показник $SPBT_1$ є мінімальним, до останнього (четвертого) встановлення автоматики” з максимальним показником $SPBT_5$.

Оптимальним, як зазначалося, є той ТРВ_j, в якого показник $NPVR_j (Y_j)$ є максимальним, а саме ТРВ_{IV}. Це означає, що максимальний економічний ефект буде у випадку одночасного застосування чотирьох ТРЗ (табл. 3). Слід зауважити, що проведена оптимізація є повною, незважаючи на те, що сумарна кількість ТРВ при вибраних 4 ТРЗ становить $2^4 = 16$, а необхідна кількість ТРВ становить $N = 4$, тобто представлена методика дала можливість зменшити кількість ТРВ у 4 рази.

Питомий прибуток від впровадження енергоощадних технологій на час їх експлуатації складає 15 – 16,5 тис.грн.

Висновки та перспективи подальших досліджень:

1. При кількості n “простих” ТРЗ потрібно розглядати не весь повний набір ТРВ, що налічує в сумі 2^n варіантів, а всього лише n “сукупних”, методично визначених варіантів.

2. Використання ДСПР дасть змогу проектувати енергоощадні схеми повітророзподілу в СКП для малогабаритних виробничих приміщень із забезпеченням нормативних параметрів повітря у змінному режимі.

3. Схеми повітророзподілу із застосуванням настільних струмин є ефективними, оскільки дають змогу забезпечувати економію енергозатрат для СКП близько 5%. При застосуванні повітророзподілу в нестационарному режимі економія холоду становить близько 40%.

4. Система з автоматикою Velimo хоч і має термін окупності, який перевищує нормативний (9,6 роки), теж є привабливою, оскільки при відносно невисоких капітальних затратах забезпечує економію енергії близько 30%.

5. При подальших дослідженнях доцільно дослідити вплив зміни режиму роботи СКП із стаціонарного на змінний на економічні показники системи кондиціонування повітря.

Література

1. Сподинок Н. А. Аналіз параметрів мікроклімату приміщень з інфрачервоним опаленням в робочій зоні / Н. А. Сподинок, В. М. Желих, Ю. С. Юркевич // Вісник Національного університету «Львівська політехніка». – 2007. – № 600 : Теорія і практика будівництва. – С. 293–296.

2. Лабай В. Й. Вибір енергоощадних умов експлуатації діючих холодильних машин split-кондиціонерів / В. Й. Лабай, Й. С. Мисак // Вісник Національного університету "Львівська політехніка". – 2011. – № 697: Теорія і практика будівництва. – С. 153–156.

3. Желих В. М. Аналіз та оцінка ефективності використання теплової ізоляції в опалювальній котельні / В. М. Желих, О. О. Савченко, Ю. С. Юркевич, Ю. В. Фурдас // Вісник Національного університету «Львівська політехніка». – 2016. – № 844: Теорія і практика будівництва. – С. 84–90.

4. Возняк О.Т., Сухолова І.Є. Патент України 40185. Повітророзподільник. – Заявка u200813086. – Опубл. 25.03.2009р. – Бюл. №6. – 2 с.

5. Возняк О.Т. Теоретичні передумови оптимізації сукупних термореновацій при проведенні енергетичного аудиту будинку / О.Т. Возняк, Ю.С. Юркевич, В.М. Желих // Вісник Національного університету «Львівська політехніка». – 2003. – № 476: Теплоенергетика. Інженерія довкілля. Автоматизація. – С. 140–145.

Стаття надійшла 26.09.2017